

УДК 621.771:546.3:620.170

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ДОРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИИ

*Василев Я.Д., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (roman.zamogilniy@yandex.ru)*

**Национальная металлургическая академия Украины**  
(49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 4)

**Аннотация.** Показано, что за счет тепла, выделяющегося в процессе холодной пластической деформации, деформируемый металл нагревается до 250 – 350 °С и более. При указанных температурах, относящихся к разряду дорекристаллизационных, в результате возврата и полигонизации изменяется предел текучести деформируемого металла на 10 – 35 %. Однако из-за отсутствия моделей для определения предела текучести с учетом влияния температуры указанным изменением пренебрегают, что приводит к большим (до 15 – 45 %) погрешностям при прогнозировании энергосиловых параметров на агрегатах холодной пластической деформации. Разработаны математические модели предела текучести в диапазоне дорекристаллизационных температур практически для всех углеродистых и легированных сталей, подвергаемых холодной пластической деформации. Приведены данные, подтверждающие надежность и удовлетворительную точность предложенных моделей, что позволяет рекомендовать их для практического использования при выполнении технологических расчетов на агрегатах холодной пластической деформации.

**Ключевые слова:** сталь, предел текучести, модель, холодная пластическая деформация, упрочнение, дорекристаллизационная температура, точность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-385-391

В процессах холодной пластической деформации большая часть работы формоизменения и сил трения превращается в тепло, что приводит к увеличению температуры деформируемого металла при холодной прокатке до 150 – 250 °С, а при сухом волочении до 250 – 350 °С и более [1 – 6]. При указанных температурах, относящихся к разряду дорекристаллизационных, в результате возврата и полигонизации изменяются механические свойства, в том числе и предел текучести деформируемого металла [7]. Известно [1, 4 – 6, 8 – 12], что при нагреве большинства углеродистых и легированных сталей с 20 до 150 – 250 °С происходит уменьшение предела текучести на 10 – 35 % и лишь для небольшого числа сталей наблюдается увеличение этого параметра на 5 – 20 %. Указанные изменения предела текучести углеродистых и легированных сталей влияют на уровень силы и мощности при холодной пластической деформации и должны быть учтены при прогнозировании энергосиловых параметров на соответствующих агрегатах [1, 3 – 6, 10, 13]. Однако из-за отсутствия моделей для определения предела текучести металла при холодной пластической деформации с учетом влияния температуры влиянием данного фактора при выполнении технологических расчетов пренебрегают. Это приводит к большим (до 15 – 45 %) погрешностям при прогнозировании энергосиловых параметров на агрегатах холодной пластической деформации [3 – 6, 10, 13].

Из изложенного следует, что создание математических моделей для прогнозирования влияния температуры на предел текучести углеродистых и легированных сталей при холодной пластической деформации является актуальной задачей. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

О влиянии дорекристаллизационных температур (20 – 500 °С) на предел текучести углеродистых и легированных сталей судили по результатам статических испытаний образцов на растяжение, приведенных в работах [8, 9], а также по материалам собственных (МСИ) и заводских (МЗИ) исследований. Предел текучести с учетом влияния температуры  $\sigma_{тi}$  для каждой стали представляли в виде произведения предела текучести  $\sigma_{те}$ , учитывающего влияние только упрочнения, на коэффициент  $k_i$ :

$$\sigma_{тi} = \sigma_{те} k_i. \quad (1)$$

Безразмерный коэффициент  $k_i$  представляет собой отношение предела текучести конкретной стали при температуре  $t_{нi}$  к пределу текучести той же стали при температуре 20 °С. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что зависимости  $k_i = \varphi(t_{нi})$  с точностью не хуже 1 – 2 % описываются полиномом пятой степени:

$$k_i = a_0 + a_1 \left( \frac{t_{нi} - 20}{t_{нi}} \right) + a_2 \left( \frac{t_{нi} - 20}{t_{нi}} \right)^2 + \dots + a_5 \left( \frac{t_{нi} - 20}{t_{нi}} \right)^5, \quad (2)$$

где  $t_n$  и  $t_{пл}$  – температура деформации полосы (образца) из данной стали и ее температура плавления, °С;  $a_0, \dots, a_5$  – коэффициенты полинома.

В табл. 1 приведены значения температуры плавления  $t_{пл}$  и коэффициентов  $a_0, \dots, a_5$  полинома (2) практически для всех углеродистых и легированных сталей, подвергаемых холодной пластической деформации.

На рисунке представлены наиболее характерные зависимости  $k_t = \varphi(t_n)$  исследованных сталей, построенные по уравнению (2).

Анализ показал, что зависимости  $k_t = \varphi(t_n)$  преобладающего большинства исследованных сталей представляют собой убывающие (см. рисунок, поз. а, б) или седловидные (поз. в) кривые и характеризуются значениями коэффициента  $k_t$  меньше 1,0. Вместе с тем было установлено, что кривые  $k_t = \varphi(t_n)$  небольшого количества исследованных сталей имеют ярко выраженный максимум в диапазоне температур 50 – 150 °С (поз. з). Коэффициент  $k_t$  этих сталей в данном интервале температур больше единицы и в зависимости от химического

Т а б л и ц а 1

Значения температуры плавления  $t_{пл}$  и коэффициентов  $a_0, \dots, a_5$  полинома (2) для исследованных сталей

Table 1. Values of melting point  $t_m$  and  $a_0, \dots, a_5$  polynomial coefficients (2) for the studied steels

Марка стали (сплава)	$t_{пл}, \text{°C}$	Значения коэффициентов полинома						Диапазон работоспособности, °С	Источник
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
Конструкционные стали									
*08кп (1)	1529	1,000	-2,444	3,080	203,730	-1282,610	2026,900	20 – 300	МСИ
		1,000	-2,314	-3,037	318,030	-1856,820	2856,080	20 – 300	МСИ
*08кп (2)	1529	1,000	-1,306	-26,335	309,382	-1032,822	1027,910	20 – 450	МСИ
		1,000	-0,827	-28,457	334,950	-1158,110	1185,032	20 – 500	МСИ
08	1520	0,987	3,512	13,322	-573,870	2466,750	-3011,480	20 – 300	МЗИ
10	1517	0,996	-7,448	118,780	-843,720	2529,822	-2700,827	20 – 500	[8]
15	1513	1,000	-3,174	90,430	-892,000	3228,900	-3927,930	20 – 500	[9]
20	1508	1,000	5,235	-145,939	968,671	-2586,900	2420,680	20 – 350	[8]
20А	1508	0,997	-2,566	27,220	-258,930	884,760	-970,740	20 – 300	МСИ
25	1503	0,993	0,458	30,943	-494,940	1856,750	-2111,610	20 – 300	[8]
30	1499	1,000	-2,690	9,570	-57,890	199,970	-262,990	20 – 600	[5], МСИ
60	1472	1,000	-2,653	98,280	-961,900	3429,760	-4172,910	20 – 400	[8]
ВС2 пс, сп	1517	0,998	0,101	-44,440	306,140	-821,390	750,640	20 – 250	[8]
15К	1513	0,998	-4,983	78,744	-594,889	1901,843	-2153,750	20 – 400	[9]
22К	1504	0,998	-0,636	-25,458	272,537	-875,280	848,469	20 – 500	[9]
09Г2С	1509	1,000	-6,155	142,490	-1300,020	4712,700	-5907,800	20 – 400	[8]
10Г2С	1506	1,000	-4,700	86,100	-644,370	1803,700	-1663,600	20 – 350	МСИ
10Г2С1	1506	1,000	-4,698	86,110	-644,750	1805,170	-1666,500	20 – 350	[8]
14Г2АФ	1506	0,999	-2,090	3,410	11,830	-69,180	63,650	20 – 400	[8]
16ГС	1506	1,005	-2,734	-8,212	195,200	-751,360	837,500	20 – 450	[9], МСИ
16ГНМ	1505	0,999	0,477	-27,182	251,728	-864,980	969,385	20 – 500	[9]
35Г2	1489	1,000	-2,668	31,030	-300,950	1238,600	-1770,700	20 – 400	МЗИ, МСИ
45Г	1484	1,000	-0,670	2,835	72,570	-1365,150	3818,300	20 – 300	МЗИ
65Г	1466	1,000	-0,349	0,878	5,831	-226,300	536,020	20 – 350	МСИ
20Х	1506	1,000	-1,954	-35,150	377,270	-738,540	-223,150	20 – 200	МСИ
30Х	1497	0,992	0,753	-85,770	845,260	-2852,260	3052,740	20 – 450	[6] МСИ
40Х	1488	0,999	-0,980	-17,600	164,460	-485,990	433,670	20 – 400	[6]
40Н	1485	1,000	-5,436	49,030	-89,570	-295,570	723,350	20 – 450	МЗИ, МСИ
45ХН, 50ХН	1480	1,000	5,134	-143,640	1208,960	-4057,450	4596,150	20 – 400	[8]
10ХСНД	1506	0,999	-2,605	7,623	6,905	-67,750	52,170	20 – 400	[8]

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

Марка стали (сплава)	$t_{пл},$ °C	Значения коэффициентов полинома						Диапазон работоспо- собности, °C	Источник
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
15ХСНД	1506	1,000	-1,507	52,790	-581,380	2482,590	-3608,340	20 – 300	[8]
18Х2Н4МА	1493	1,000	-0,344	-0,408	33,904	-201,760	268,410	20 – 500	[8]
20ХН4ФА	1493	0,999	-0,641	-3,165	71,800	-34 605,000	418,040	20 – 450	[8]
34ХН3М	1486	1,000	-0,993	7,330	-63,830	193,730	-188,130	20 – 450	[8]
40ХН2МА	1483	1,000	-1,065	-4,668	58,693	-166,560	109,000	20 – 450	[8]
48ХГТ	1505	0,998	-1,070	0,127	-46,130	288,540	-442,760	20 – 400	[8]
30ХГСА	1490	1,000	3,575	-82,468	511,530	-1025,130	315,600	20 – 250	МСИ
12Х1МФ	1513	1,000	-2,226	27,800	-274,310	1029,060	-1258,720	20 – 350	[8]
15Х5М	1501	0,999	-0,764	-10,124	93,133	-260,530	196,680	20 – 400	[8]
20ХМА	1506	1,000	-5,920	101,800	-673,900	1912,000	-2010,000	20 – 500	МСИ, МЗИ
20Х3МВФ	1502	1,000	-0,784	7,100	-72,500	276,120	-364,310	20 – 500	[9]
25Х2М1Ф	1497	0,999	0,576	-8,039	-42,410	382,110	-629,770	20 – 350	[9]
30ХМ, 30ХМА	1497	1,004	-3,393	36,060	-190,120	476,090	-482,540	20 – 500	[9]
35ХМФА	1491	0,999	9,670	-175,200	1141,580	-3146,000	3014,900	20 – 450	МСИ, МЗИ
38ХМЮА	1490	1,000	-1,488	52,192	-949,412	5611,100	-10 732,140	20 – 350	МСИ, МЗИ
38Х2МЮА	1489	0,999	0,087	-32,100	303,900	-1021,100	1093,330	20 – 450	[9]
40ХФА	1488	1,000	-2,253	61,297	-646,000	2663,380	-3816,750	20 – 400	[9]
50ХФА	1490	1,000	1,623	-20,280	-43,560	799,000	-1792,000	20 – 450	МСИ, МЗИ
ШХ15	1437	0,995	9,080	-265,750	2663,200	-10 149,150	12 812,800	20 – 350	[8], МСИ
65С2ВА	1455	1,000	-0,824	-8,214	130,530	-636,190	943,460	20 – 400	[8]
Инструментальные стали									
Х5	1429	1,000	-2,611	-45,940	620,770	-2451,170	3083,670	20 – 400	МЗИ
Х5М	1428	1,000	-1,689	15,269	-121,654	463,550	-640,860	20 – 400	МЗИ
Х8	1335	1,000	-1,855	22,675	-160,070	536,100	-670,600	20 – 400	МЗИ
9ХС	1434	1,000	-1,731	-32,763	352,720	-1118,800	1112,900	20 – 450	[5]
8Х3	1450	1,000	-3,285	12,690	3,892	-111,360	87,916	20 – 400	МЗИ
5ХГМ	1475	0,998	0,150	-26,990	199,660	-565,490	506,220	20 – 450	[8]
4Х5МФ1С	1471	1,000	-0,174	-19,060	189,700	-673,930	792,330	20 – 500	[8]
4ХВ2С	1485	0,999	0,622	-13,045	114,660	-381,630	356,650	20 – 500	[8]
5ХВ2С	1474	1,000	-1,499	2,904	97,206	-664,150	1074,930	20 – 400	МЗИ
6ХВГ	1469	1,000	-1,713	18,480	-149,920	579,100	-857,930	20 – 400	МЗИ
18Х2Н4ВА	1493	1,000	-0,345	-0,409	33,950	-202,190	269,130	20 – 450	[8]
4Х2В5ФМ (ЭИ959)	1486	1,000	-0,616	-9,937	129,960	-576,700	817,900	20 – 400	МЗИ
18Х3МФ (ЭИ575)	1361	1,000	-1,731	7,799	2,339	-108,460	173,660	20 – 450	МЗИ
Специальные стали									
08Х13	1487	1,000	1,622	-46,670	312,480	-867,911	836,220	20 – 400	[9]
Х17, 12Х17	1476	1,000	-1,771	10,436	-50,470	99,000	-79,610	20 – 400	[8]
20Х13	1476	0,993	2,515	-43,910	210,860	-448,465	343,455	20 – 450	[9]
30Х13	1468	1,000	-1,236	19,590	-156,570	478,850	-518,440	20 – 450	[9]
40Х13	1459	0,997	1,141	-46,090	359,230	-1127,450	1178,750	20 – 400	[9]
0Х21Н5Т	1448	1,000	-0,139	-7,719	183,200	-1572,320	3618,800	20 – 350	МЗИ, МСИ
0Х21Н6М2Т	1440	0,999	1,013	-104,310	994,440	-3412,350	3807,060	20 – 350	[9]
0Х27Ю5А	1469	1,000	-1,960	2,767	-7,209	40,611	-55,864	20 – 650	МЗИ, МСИ

Таблица 1 (продолжение)

Марка стали (сплава)	$t_{пл}, ^\circ C$	Значения коэффициентов полинома						Диапазон работоспособности, $^\circ C$	Источник
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
12X18H9	1430	1,000	-2,483	13,040	-87,050	297,200	-350,580	20 – 350	[5], МСИ
14X17H2	1469	0,999	-0,120	-28,500	270,300	-923,690	1025,800	20 – 450	[8]
1X12B2MФ (ЭИ756)	1498	1,000	-0,347	8,022	-92,260	271,153	-243,220	20 – 500	МЗИ
15X12BHMФ	1484	0,999	0,470	-25,000	196,430	-556,980	479,820	20 – 400	[8]
20X12BHMФ	1478	1,000	-0,673	-0,615	-18,530	146,640	-269,880	20 – 500	[8]
34XH3M	1485	0,999	-0,836	-8,472	84,540	-264,420	251,200	20 – 450	[8]
10X14Г14Н4Т	1397	1,000	-3,123	11,040	-47,490	114,850	-104,370	20 – 300	[8]
37X12H8Г8МФБ	1399	1,000	-2,230	7,760	-38,210	147,540	-188,500	20 – 400	[8]
40X9C2	1456	1,000	-1,786	13,327	-80,990	191,880	-150,100	20 – 400	[8]
40X10C2M	1453	1,000	-4,070	26,460	-77,860	92,570	-43,070	20 – 450	[8]
40X18H25C2	1341	1,000	-2,228	6,315	10,477	-80,968	98,764	20 – 500	МЗИ
XH35BT	1326	1,000	-1,525	-15,160	153,560	-441,030	416,520	20 – 500	[8]
12XM	1513	1,004	-2,565	21,180	-12,817	-258,980	480,420	20 – 500	[9], МСИ
15XM	1510	0,999	-0,806	-18,527	109,070	-160,800	5,099	20 – 500	[9]
35XM	1493	0,991	4,950	-143,110	1122,600	-3400,600	3420,230	20 – 450	[9], МСИ
25X1MФ	1501	1,003	-4,330	88,790	-786,800	2806,120	-3452,990	20 – 350	[9]
20X1M1Ф1TP	1502	0,99	3,882	-122,560	1033,170	-3283,900	3407,290	20 – 450	[9]
15X11 MФ	1489	1,000	0,495	-24,254	221,090	-768,720	876,740	20 – 500	[9]
20X12H2B2MФ	1481	1,000	-1,480	6,348	-19,430	20,630	-18,790	20 – 450	[9]
18X12BMBФP	1486	1,000	-0,342	5,888	-45,650	112,230	-108,430	20 – 500	[9]
12X18H9T	1421	1,003	-2,533	-2,544	76,389	-254,140	261,330	20 – 350	[9], МСИ
12X18H12T	1413	1,003	5,952	-125,170	709,200	-1639,930	1345,730	20 – 300	[9]
08X16H11M3	1442	1,000	-3,114	20,595	-133,210	403,240	-415,950	20 – 300	[9]

\* Сталь производства ОАО «Арселор Миттал Темиртау» (Казахстан) (1) и ОАО «Запорожсталь» (Украина) (2) (числитель –  $\varepsilon_\Sigma = 0$ , знаменатель –  $\varepsilon_\Sigma > 0$ )

состава и их структурного состояния его значения могут достигать 1,05 – 1,20 и более [8, 9, 11]. Разный характер изменения зависимостей  $k_t = \varphi(t_{пл})$  объясняется особенностями протекания процессов возврата и полигонизации отдельных сталей [7].

Как следует из модели (1), для определения предела текучести любой стали в диапазоне дорекристаллизационных температур  $\sigma_{тл}$ , помимо коэффициента  $k_t$ , необходимо знать также величину  $\sigma_{те}$  последней. Для расчета  $\sigma_{те}$  рекомендуются модели А.В. Третьякова [2, 14]:

$$\sigma_{те} = \sigma_{тисх} + m(100\varepsilon_\Sigma)^k = \sigma_{тисх} \left[ 1 + \frac{m}{\sigma_{тисх}} (100\varepsilon_\Sigma)^k \right], \quad (3)$$

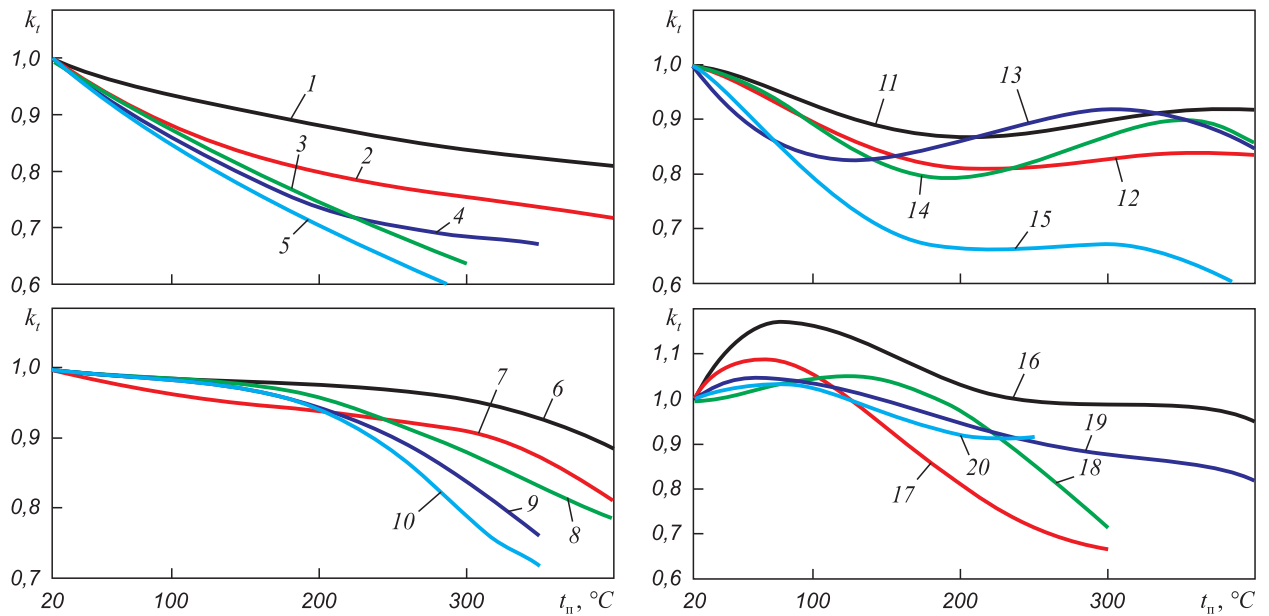
в которых  $\sigma_{тисх}$  и  $m$  – значение предела текучести стали после горячей деформации ( $\varepsilon_\Sigma = 0$ ) при  $t_{пл} = 20^\circ C$  и множитель, характеризующий интенсивность ее упрочнения, Н/мм<sup>2</sup>;  $k$  – показатель, определяющий характер упрочнения стали, безразмерная величина;  $\varepsilon_\Sigma$  – суммарное относительное обжатие при холодной пластической деформации, доли единицы.

Модель (3) широко используется при выполнении технологических расчетов [2, 3, 5, 6, 10 – 14]. Значения  $\sigma_{тисх}$ ,  $m$ ,  $k$  для сталей, представленных в табл. 1, приведены в работах А.В. Третьякова [2, 14] и в технической литературе [5, 10].

После подстановки выражений (2) и (3) в зависимость (1) получили следующую математическую модель для определения предела текучести при холодной пластической деформации углеродистых и легированных сталей в диапазоне дорекристаллизационных температур:

$$\sigma_{тл} = \sigma_{тисх} \left[ 1 + \frac{m}{\sigma_{тисх}} (100\varepsilon_\Sigma)^k \right] \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{t_{пл} - 20}{t_{пл}} \right) + a_2 \left( \frac{t_{пл} - 20}{t_{пл}} \right)^2 + \dots + a_5 \left( \frac{t_{пл} - 20}{t_{пл}} \right)^5 \right]. \quad (4)$$

Модель (4) предназначена для прогнозирования предела текучести при холодной пластической деформации углеродистых и легированных сталей на любом аг-



Зависимости  $k_t = \varphi(t_n)$  некоторых углеродистых и легированных сталей, построенные по уравнению (2) при  $k_t < 1,0$  (а, б, в) и  $k_t > 1,0$  (г):  
 1 – X5M; 2 – 10XCHД; 3 – сталь 30; 4 – 12X18H9T; 5 – 10X14Г14Н4Т; 6 – 18X2H4МА; 7 – 20XН4ФА; 8 – 1X12В2МФ; 9 – 65Г;  
 10 – 0X21H5T; 11 – 22К; 12 – 08кп; 13 – 40Н; 14 – 30X; 15 – X5; 16 – 35ХМФА; 17 – 12X18H12T; 18 – сталь 25; 19 – 50ХФА; 20 – 30XГСА

Dependences  $k_t = \varphi(t_n)$  of certain carbon and alloyed steels, set up by equation (2) with  $k_t < 1,0$  (a, б, в) and  $k_t > 1,0$  (г):  
 1 – Kh5M; 2 – 10KhSND; 3 – steel 30; 4 – 12Kh18N9T; 5 – 10Kh14G14N4T; 6 – 18Kh2N4MA; 7 – 20KhN4FA; 8 – 1Kh12V2MF; 9 – 65G;  
 10 – 0Kh21N5T; 11 – 22K; 12 – 08kp; 13 – 40N; 14 – 30Kh; 15 – Kh5; 16 – 35KhMFA; 17 – 12Kh18N12T; 18 – steel 25; 19 – 50KhFA; 20 – 30KhGSA

регаге. Температура  $t_n$  деформируемого металла может быть определена экспериментальным или расчетным путем. Более предпочтительным является второй путь. Например, для расчета температуры полосы на выходе из очага деформации при холодной прокатке  $t_{1n}$  может быть использована формула [13, 15]:

$$t_{1n} = t_{0в} + \left[ t_{0п} - t_{0в} + \frac{1}{1 + \delta_\tau} \frac{\eta_\pi 1,15\sigma_{\text{тср}} \xi_{\text{ср}}}{c_\pi \rho_\pi} \ln \frac{h_0}{h_1} + \frac{\delta_\tau}{1 + \delta_\tau} \sqrt{\frac{\lambda_\pi}{c_\pi \rho_\pi \tau}} \frac{\eta_\pi (p_{\text{срс}} - 1,15\sigma_{\text{тср}} \xi_{\text{ср}}) h_1}{\lambda_\pi \sqrt{\pi}} \ln \frac{h_0}{h_1} \right] \times \exp \left[ -\frac{4}{\rho_\pi c_\pi (h_0 + h_1)} \sqrt{\frac{\lambda_\pi c_\pi \rho_\pi \tau}{\pi}} \right], \quad (5)$$

где

$$\delta_\tau = \sqrt{\frac{\lambda_\pi c_\pi \rho_\pi}{\lambda_\pi c_\pi \rho_\pi}}; \quad (6)$$

$$\eta_\pi = 1 - \frac{1,15\sigma_{\text{тср}} \xi_{\text{ср}}}{p_{\text{срс}}} (1 - \eta_{\text{вых}}). \quad (7)$$

В выражениях (5) – (7)  $t_{0в}$  и  $t_{0п}$  – среднемассовая температура рабочих валков и температура полосы на входе в очаг деформации;  $h_0$  и  $h_1$  – толщина полосы на входе и выходе из очага деформации;  $\sigma_{\text{тср}}$  и  $\xi_{\text{ср}}$  – среднее значение напряжения текучести материала полосы в очаге деформации и коэффициент, учитывающий влияние среднего натяжения полосы при холодной прокатке на  $\sigma_{\text{тср}}$ ;  $\lambda_\pi$ ,  $\rho_\pi$ ,  $c_\pi$  и  $\lambda_\pi$ ,  $\rho_\pi$ ,  $c_\pi$  – соответственно теплопро-

водность, плотность и теплоемкость материала рабочих валков и полосы;  $\delta_\tau$ ,  $\eta_{\text{вых}}$  и  $\eta_\pi$  – соответственно термофизический критерий, коэффициент выхода тепла и приведенный коэффициент выхода тепла при холодной прокатке;  $p_{\text{срс}}$  – среднее контактное нормальное напряжение при холодной прокатке, рассчитанное с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы;  $\tau$  – время прохождения точки на поверхности полосы через очаг деформации при прокатке.

В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициента  $k_t$  и предела текучести  $\sigma_{\text{тн}}$  стали 08кп [ $\sigma_{\text{те}} = 260 + 34,6(100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$ ] при холодной прокатке жести 0,18×855 мм со скоростью 33 м/с на шестиклетевом стане 1400 [10]. Расчет температурно-скоростных и энергосиловых параметров при прокатке жести осуществляли по моделям, приведенным в работе [13]. Для сравнения в табл. 2 представлены также значения предела текучести  $\sigma_{\text{те}}$  стали 08кп, рассчитанные с учетом влияния только упрочнения.

Из табл. 2 видно, что значения  $\sigma_{\text{тн}}$  меньше  $\sigma_{\text{те}}$  и в рассматриваемых температурных условиях холодной прокатки составляют  $(0,880 - 0,972)\sigma_{\text{те}}$ . При холодной пластической деформации других, более чувствительных к температуре сталей (например, 12X18H9T, 16ГС, 30, X5 и др.), значения  $\sigma_{\text{тн}}$  при  $t_n = 150 - 250$  °С уменьшаются до  $(0,65 - 0,75)\sigma_{\text{те}}$ , т.е. на 25 – 35 % и более. Исключением в этом смысле являются только такие стали, как 25, 12X18H12T, 35ХМФА и др., значения предела текучести которых при  $t_n = 50 - 150$  °С увеличиваются до  $(1,05 - 1,20)\sigma_{\text{те}}$ .



**Результаты расчета предела текучести  $\sigma_{тл}$  стали 08кп при холодной прокатке жести на шестиклетевом стане 1400**

*Table 2. Calculation of flow limit  $\sigma_{тл}$  of 8kp steel during cold rolling of 0,18×855 mm tin on six-frame rolling mill 1400*

Параметр	Значение параметра для клетки номер					
	1	2	3	4	5	6
$\epsilon_{\Sigma}$	0,140	0,483	0,696	0,817	0,879	0,925
$t_{1п}, ^\circ\text{C}$	61	108	150	184	207	223
$k_t$	0,972	0,906	0,880	0,882	0,888	0,891
$\sigma_{те}, \text{Н/мм}^2$	429	615	702	747	768	783
$\sigma_{тл}, \text{Н/мм}^2$	417	557	618	659	682	698

**Выводы.** Разработаны математические модели предела текучести в диапазоне дорекристаллизационных температур практически для всех углеродистых и легированных сталей, подвергаемых холодной пластической деформации. Приведены данные, подтверждающие надежность и удовлетворительную точность предложенных моделей, что позволяет рекомендовать их для использования при выполнении технологических расчетов на агрегатах холодной пластической деформации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- Белосевич В.К., Нетесов Н.П. Совершенствование процесса холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1971. – 272 с.
- Теория прокатки. Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин, А.В. Третьяков, Г.С. Никитин. Под научн. ред. В.И. Зюзина, А.В. Третьякова. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
- Мазур В.Л., Ноговицин А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА «Дніпро ВАЛ», 2010. – 500 с.
- Робертс В. Холодная прокатка стали / Пер. с англ. В. Робертс. – М.: Металлургия, 1982. – 544 с.
- Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
- Василев Я.Д., Дементенко А.В., Горбунков С.Г. Производство жести методом двойной прокатки. – М.: Металлургия, 1994. – 125 с.
- Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 566 с.
- Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
- Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур. Справочник. В 2-х кн. Кн.1. – М.: Металлургия, 1991. – 283 с.
- Василев Я.Д., Дементенко А.В. Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос. – В кн.: Непрерывная прокатка. Коллективная монография. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. С. 137 – 293.
- Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации. – 2-е изд. перераб. и доп.: Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
- Холодная прокатка и отделка жести / А.Ф. Пименов, О.Н. Сосковец, А.И. Трайно и др. – М.: Металлургия, 1990. – 208 с.
- Василев Я.Д. Основы теории продольной холодной прокатки. – В кн.: Пластическая деформация металлов. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. С. 107 – 125.
- Третьяков А.В. Теория, расчет и исследование станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1966. – 255 с.
- Василев Я.Д. Инженерная методика расчета температуры полосы при холодной прокатке // Производство проката. 2012. № 6. С. 15 – 19.

Поступила 6 ноября 2014 г.

**MATHEMATICAL MODELS OF YIELD STRESS OF CARBON AND ALLOYED STEELS IN THE RANGE OF PRERECRYSTALLIZATION TEMPERATURE OF DEFORMATION**

*Ya.D. Vasilev*

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

**Abstract.** It has been shown that due to the heat released in the process of cold plastic deformation the deformable metal is heated up to 250 – 350 °C or more. At these temperatures, related to the recrystallization category, at the result of the return and polygonization the deformable metal yield strength changes by 10 – 35 %. However, due to lack of models for determining the yield stress

for the effects of temperature the determined change can be neglected, and it leads to large errors (up to 15 – 45 %) in the prediction of power parameters of cold plastic deformation units. The mathematical models of the yield strength of carbon and alloy steels in the temperature range before recrystallization were determined. The author has shown the evidence of performance and reliability of the proposed models that makes them effective for practical use in performing engineering calculations on units of cold plastic deformation.

**Keywords:** yield stress, model, temperature, hardening, steel, cold plastic deformation, range, recrystallization, accuracy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-385-391

## REFERENCES

1. Belosevich V.K., Netesov N.P. *Sovershenstvovanie protsessa kholodnoi prokatki* [Advancement of cold rolling process]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 272 p. (In Russ.).
2. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I., Tret'yakov A.V., Nikitin G.S. *Teoriya prokatki. Spravochnik* [Theory of rolling. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 335 p. (In Russ.).
3. Mazur V.L., Nogovitsin A.V. *Teoriya i tekhnologiya tonkolistovoi prokatki (chislennyi analiz i tekhnicheskie prilozheniya)* [Theory and technology of thin plate rolling (digital analysis and technical applications)]. Dnepropetrovsk: RVA "Dnipro VAL", 2010, 500 p. (In Russ.).
4. Roberts William L. *Cold rolling of steel*. New York; Basel: Marcel Dekker, Inc., 1978. (Russ.ed.: Roberts W.L. *Kholodnaya prokatka stali*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 544 p.).
5. Vasilev Y.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov kholodnoi prokatki* [Engineering models and algorithms for cold rolling parameters calculation]. Moscow: Metallurgiya, 1995, 368 p. (In Russ.).
6. Vasilev Y.D., Dementienko A.V., Gorbunkov S.G. *Proizvodstvo zhesti metodom dvoynoi prokatki* [Tin production by double rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 125 p. (In Russ.).
7. Gulyaev A.P. *Metallovedenie: Uchebnik dlya vuzov* [Metal science: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 566 p. (In Russ.).
8. *Marochnik stali i splavov* [Steels and alloys: grade guide]. Sorokin V.G. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
9. Maslenkov S.B., Maslenkova E.A. *Stali i splavy dlya vysokikh temperatur. Spravochnik. V 2-kh kn. Kn. 1* [Steels and alloys for high temperatures. Reference book. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 283 p. (In Russ.).
10. Vasilev Ya.D., Dementienko A.V. Continuous rolling of thin and extra thin strips. In.: *Nepreryvnaya prokatka. Kollektivnaya monografiya* [Continuous rolling. Collective monograph]. Dnepropetrovsk: RVA "Dnipro-VAL", 2002, pp. 137–293. (In Russ.).
11. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii. Spravochnik* [Resistance to plastic deformation. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p. (In Russ.).
12. Pimenov A.F., Soskovets O.N., Traino A.I., Traino V.L., Netesov N.P. *Kholodnaya prokatka i otdelka zhesti* [Cold rolling and finishing of tin]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 208 p. (In Russ.).
13. Vasilev Ya.D. Basics of theory of longitudinal cold rolling. In.: *Plasticheskaya deformatsiya metallov* [Plastic deformation of metals]. Dnepropetrovsk: Aktsent PP, 2014, pp. 107–125. (In Russ.).
14. Tret'yakov A.V. *Teoriya, raschet i issledovanie stanov kholodnoi prokatki* [Theory, calculation and study of cold rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 255 p. (In Russ.).
15. Vasilev Y.D. Engineering method of calculation of strip temperature at cold rolling. *Proizvodstvo prokata*. 2012, no. 6. pp. 15–19. (In Russ.).

**Information about the author:**

**Ya.D. Vasilev**, Dr. Eng. (Sci.), Professor of the Chair of "Metal Forming" (roman.zamogilniy@yandex.ru)

Received November 6, 2014